

Simulación Interactiva de accionamientos híbridos de SRM utilizando elementos finitos.

Xavier González Latorre

Trabajo final de grado de Grado en Ingeniería Eléctrica,
Departamento de Ingeniería Eléctrica (DEE),
Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG),
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC),
Avinguda Victor Balaguer 1, 08800 Vilanova i la Geltrú, Barcelona.

Resumen

En la actualidad los motores SRM (motores de reluctancia autoconmutados) son utilizados en una gran multitud de aplicaciones y sectores. En este proyecto se pretende estudiar una vertiente de estos, el motor MHR (motor híbrido de reluctancia) para poder determinar qué ventajas tiene respecto a los motores anteriormente nombrados.

Para ello, mediante una serie de simulaciones, se pretende comprobar que ventajas representa el motor MHR respecto al SRM.

Palabras clave

SRM, MHR, FEMM, Coupling to Simulink, FLUX, Simulación, Matlab/Simulink, Elementos Finitos, accionamiento.

1. Introducción

Este proyecto se ha realizado con la intención de estudiar el accionamiento MHR y poder ver qué ventajas puede representar éste comparado con el SRM.

El proyecto se divide en 6 capítulos y 2 anexos:

- El motor de reluctancia autoconmutado híbrido (MHR)
- Software de simulación
- Simulaciones realizadas
- Conclusiones
- Futuras vías de trabajo
- Referencias
- Tutorial del programa Flux 11.2.
- Tutorial de la herramienta Sketcher 2D

2. Introducción a los motores de reluctancia autoconmutada híbridos

El motor de reluctancia autoconmutada MHR, es un motor de corriente continua sin escobillas constituido por un rotor y un estator, ambos con polos salientes construidos mediante el apilamiento de chapas de material electromagnético y a diferencia de los accionamientos SRM, con imanes entre los polos estáticos.

Existen varios tipos según la disposición de los imanes en el estator.

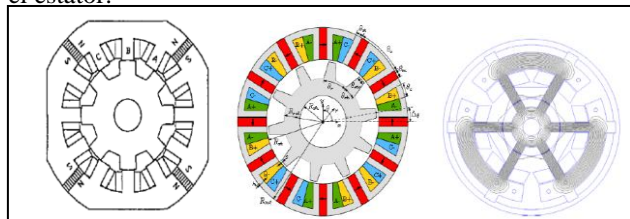


Fig. 1. Tipologías de MHR según la disposición de los imanes.

La excitación del motor se produce a través de unos enrollamientos dispuestos en las ranuras del estator. Siendo el número de espiras, el número de vueltas que se da al enrollamiento en el polo estático. De manera que si se crea una diferencia de potencial en bornes de una fase, circulara una corriente, generando en el enrollamiento un flujo magnético que atraerá el polo saliente rotórico más cercano, intentando reducir la reluctancia creada por el aire y aumentando la inductancia de manera que mediante la continuada conmutación de las fases se producirá el giro del motor.

La constitución del accionamiento MHR está formada por varios bloques:

- La estructura magnética reluctante o convertidor electromecánico.
- El convertidor estático o bloque de potencia.
- Un bloque de disparo para acoplar el sistema de control al sistema estático de potencia.
- El dispositivo de control, formado por la lógica de conmutación.

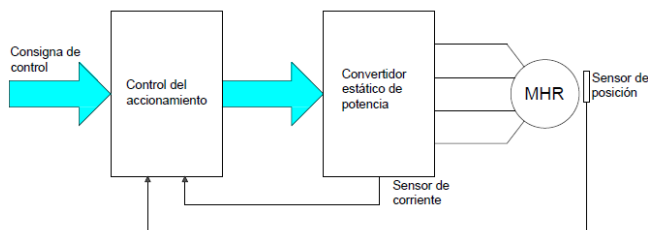


Fig. 2. Esquema de un accionamiento con SRM

El convertidor estático de potencia en el caso del accionamiento MHR es el mismo que en el accionamiento SRM.

Es el encargado, a través de las señales que recibe del controlador, de generar la señal adecuada para controlar el motor.

La función del convertidor es abrir y cerrar los interruptores, en el orden que le indique el controlador, el cual sabe en todo momento cual es la posición del rotor gracias a captadores de posición, la conmutación entre fases dependerá de la velocidad a la que tenga que ir el motor. Los interruptores utilizados en estas aplicaciones dependiendo de la potencia que tienen que suministrar. Si se desea suministrar potencias inferiores a 1kW se utilizarán MOSFET's y para potencias superiores son más utilizados los IGBT's.

Existen varias tipologías de convertidor pero el más utilizado en este tipo de accionamientos es el clásico.

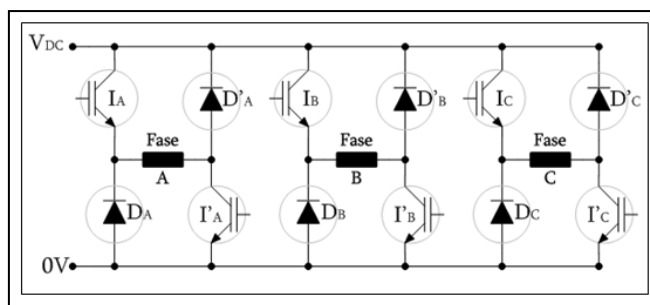


Fig. 3. Convertidor clásico.

En lo que a la secuencia de disparo de las fases se refiere, se utilizarán los captadores de posición para determinar en qué posición se encuentra en cada momento de su funcionamiento ..

Como se ha descrito anteriormente el giro del motor se produce, debido a que los polos rotóricos van en busca de la mínima reluctancia y por lo tanto la máxima inductancia. De esta manera para que se produzca el giro completo del rotor únicamente se tendrán que activar las fases del estator en la secuencia correcta. Para realizar la secuencia correcta se debe tener en cuenta que normalmente el inicio de conducción de cada fase coincide cuando el polo del rotor está cerca de la posición de máxima reluctancia, y la conducción de esta fase se mantendrá un determinado ángulo de paso (ϵ).

La curva característica par-velocidad de los accionamientos SRM se divide en 3 zonas diferenciadas, que se muestran en la figura siguiente:

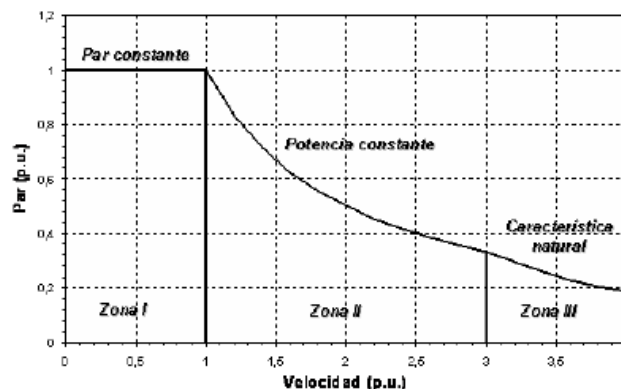


Fig. 4. Característica par-velocidad de los accionamientos MHR.

Para cada una de las zonas se aplicará un tipo de control diferente. En la zona de par constante el control será sobre la corriente siendo este control de histéresis o de modulador por anchura de pulsos PWM. En la zona de potencia constante se aplicará un control a pulso único, y finalmente en la zona de característica natural no se aplicará ningún tipo de control.

El accionamiento MHR trabaja buscando la máxima inductancia y mínima reluctancia, así podemos ver que lo idóneo es disparar la fase desde el punto de no alineamiento hasta el punto de máximo alineamiento, ya que en la gráfica de inductancia según la posición rotórica, la pendiente de la inductancia es positiva.

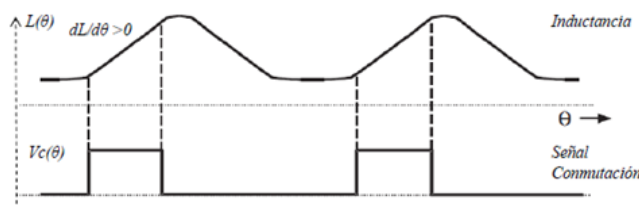


Fig. 6. Perfil de inductancia idealizada disparo motor.

Analizando, las ventajas y los inconvenientes de la utilización de los motores SRM :

Ventajas:

- Constitución mecánica sencilla y robusta.
- Mayor producción de par debido al efecto de los imanes.
- La mayoría de pérdidas se concentran en el estator, esto facilita la refrigeración y la posibilidad de trabajar a elevada temperaturas.
- La mayoría de los convertidores utilizados en los accionamientos con SRM, son tolerantes a faltas.
- En caso de producirse una falta, la tensión de circuito abierto es nula y las corrientes de cortocircuito reducidas.

- Elevado rendimiento y buena relación par/volumen y par/inercia.
- Característica par-velocidad adaptable dependiendo de las necesidades.

Inconvenientes:

- Requieren de un elevado número de terminales y conexiones.
- El par motor presenta un notable rizado, como consecuencia de su naturaleza pulsante.
- Se trata de un accionamiento ruidoso.
- La estructura electromagnética necesita alimentarse mediante un convertidor, además necesita sensores de posición y reguladores electrónicos.
- Estos accionamientos tienen un complejo procedimiento de diseño.

3. Software de simulación

La simulación de un accionamiento MHR es un procedimiento laborioso en el que las diversas partes que lo componen deben ser tratadas en forma de un conjunto a fin de realizarla de forma correcta. Durante la simulación de este tipo de accionamientos deberemos tratar con distintas variables de distinta tipología como puede ser eléctrica, magnética, mecánica, etc.

En el caso de la simulación que se quiere llevar a cabo deberemos tratar la estructura magnética reluctante y el convertidor.

Ya que existen muchas variables a analizar deberemos disponer de una potente herramienta de cálculo de soporte informático. Gracias a esta herramienta seremos capaces de realizar una simulación del accionamiento y así conocer el comportamiento de éste una vez construido sin tener que disponer de él para prescindir de esta manera los costes que supondría construirlo para realizar un posterior ensayo de laboratorio y poder modificar los parámetros que se crean necesarios para obtener así el diseño óptimo y de esta forma hallar los resultados deseados.

Por ello en este proyecto se han trabajado diferentes formas de simulación. Las simulaciones realizadas han sido en estado estático y dinámico, donde en cada una se obtienen unos datos de interesantes para extraer conclusiones sobre el accionamiento. Los análisis estáticos han sido realizados en los programas FLUX y FEMM, estos son programas de elementos finitos, en ellos podemos extraer graficas correspondientes al flujo y el par.



Fig. 7. Principales software utilizados.

Para el análisis dinámico se recurren a 2 sistemas para el análisis. Uno de ellos llamado “Look up tables” que consiste en extraer los datos de las gráficas del análisis

estático y mediante un esquema con operaciones matemáticas en Matlab/Simulink se realiza la simulación. El otro método es con Coupling to Simulink, una extensión del programa FLUX, esta extensión permite colocar un bloque en el programa Matlab/Simulink y llamar a una estructura generada en FLUX, entonces mediante un esquema realizado en Simulink es posible realizar el control del motor.

4. Simulaciones realizadas.

En esta etapa del proyecto se presentan los resultado de las diferentes simulaciones llevadas a cabo en el transcurso de éste para su posterior análisis y determinar así si los motores MHR son una mejor alternativa a los SRM .

Para llevar esto a cabo se han realizado una serie de comprobaciones:

- Decidir qué método de elementos finitos utilizar en las simulaciones.
- Determinación de la zona de la zona de trabajo lineal (no saturación) y no lineal (saturación) del material utilizado en la chapa .
- Determinar en qué zona de trabajo funciona nuestro MHR.
- Comparar par del MHR con imanes y sin imanes.

Mediante una serie de simulaciones se concluye que el resultado de las simulaciones mediante el método de elementos finitos FLUX presenta unas simulaciones mucho más próximas a los resultados obtenidos mediante las medidas realizadas en el laboratorio que utilizando FEMM.

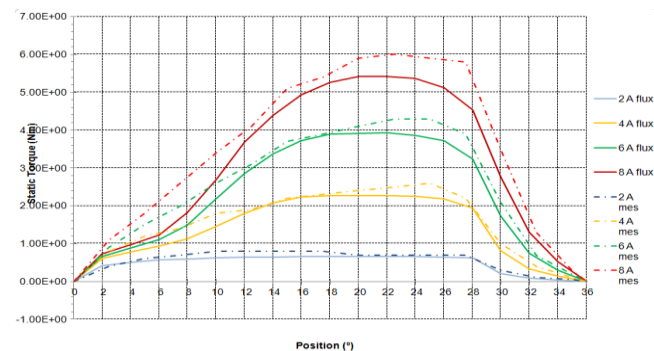


Fig. 8. Comparativa de curvas obtenidas en FLUX y mediante medidas de laboratorio.

Se realiza un análisis de la curva característica B-H del material de manera que se determina el punto a partir del cual, se pasa a la zona no lineal del material (saturación).

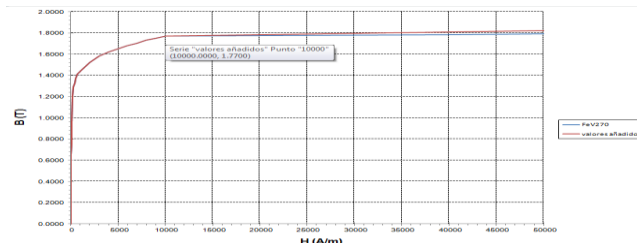


Fig. 9. Curva B-H de la chapa utilizada en el MHR analizado.

Mediante FLUX, se realizan una serie de mediciones de la inducción magnética para la posición alineada de los polos rotóricos y estáticos y la posición desplazada a 15° de esa zona de alineamiento (donde la inducción obtiene valores máximos) y varios valores de intensidad.

POSICIÓN DEL ROTOR	VALOR INTENSIDAD (A)	INDUCCIÓN MAGNÉTICA (T)
ALINEADA	6	1.3207087413E+00
ALINEADA	10	1.40917123E+00
ALINEADA	14	1.49082957E+00
ALINEADA	20	1.57672648E+00
DESPLAZADA 15°	2	1.67268310E+00
DESPLAZADA 15°	4	1.73229732E+00
DESPLAZADA 15°	6	1.75262018E+00
DESPLAZADA 15°	8	1.78653328E+00
DESPLAZADA 15°	10	1.83366548E+00
DESPLAZADA 15°	14	1.92032648E+00
DESPLAZADA 15°	20	1.95448930E+00

Tabla.1. Valores de la inducción según la posición rotórica para diversos valores de la corriente.

De esta forma se puede observar que en varios valores de intensidad en la posición desplazada del rotor, se obtienen valores superiores a éste de manera que se está trabajando en la zona de saturación del material.

Se ha realizado una comparación entre los valores del par del motor MHR y el motor sin imanes.

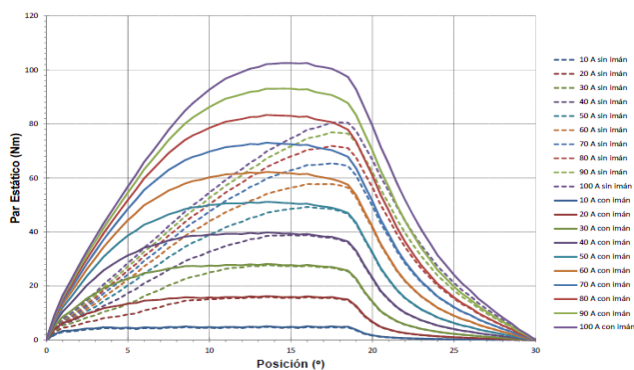


Fig. 10. Comparación del motor con imanes y sin ellos.

Se ha realizado una simulación mediante el método LookUp Tables para poder observar las formas de onda del motor MHR en funcionamiento.

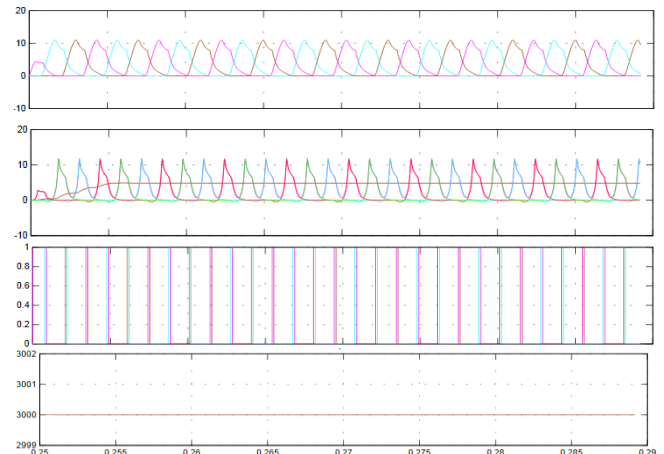


Fig. 11. Graficas de las forma de onda del MHR obtenidas mediante LookUp Tables

5. Conclusiones

- No se ha podido llevar a cabo la idea de realizar una simulación del comportamiento dinámico mediante "Coupling to simulink" debido a problemas con la herramienta del software Flux.
- La herramientas de cálculo mediante elementos finitos pueden ayudar al diseño de motores aunque el uso de estas es muy complejo.
- Durante el desarrollo de este proyecto queda demostrado que el motor MHR (de reluctancia híbrido) es capaz de trabajar en la zona de saturación (debido al efecto que ejercen los imanes) produciendo un mayor par para los mismos valores de corriente que un SRM de manera que pueden ser considerados una buena alternativa con respecto a estos aunque se requiere un estudio más profundo de su funcionamiento (comportamiento dinámico).
- Durante la realización del trabajo se han utilizado diversos métodos de simulación de los que se puede sacar varias conclusiones de cada uno de ellos:

FEMM: Este programa de elementos finitos es de los más utilizados en la simulación ya que se trata de un software de libre distribución. Es un programa relativamente sencillo de utilizar y es muy rápido para realizar análisis estáticos y de zonas puntuales.

COUPLING TO SIMULINK: Es el sistema que utiliza el software Flux para realizar las simulaciones del comportamiento dinámico. Las ventajas que tiene este programa es que puedes realizar cambios en el diseño de los modelos a simular y poder analizarlo al momento. Se trata de un programa muy lento para realizar cualquier simulación, ya que está utilizando también el software Matlab (consume una gran cantidad de recursos) a la vez que Flux al realizar este proceso. Es un programa que

presenta una gran variedad de opciones pero que al ser un software no muy utilizado la bibliografía con respecto a este es casi nula. Así pues, conseguir información sobre las pautas a seguir cuando nos encontramos con cualquier problema, es difícil.

LOOKUP TABLES: Ha sido el método de simulación menos utilizado en este proyecto. Gracias a este método se puede obtener el par de cada una de las fases de forma dinámica. Al obtener las simulaciones rápidamente, resulta útil para poder determinar los ángulos de disparo de las fases. Esto facilita la tarea de escoger qué ángulos de disparo son los adecuados para el accionamiento. Por otra parte, es necesaria la utilización de otro software externo de elementos finitos para obtener las tablas necesarias para su funcionamiento.

6. Futuras vías de trabajo

- Continuar con el estudio del accionamiento MHR ya que se tiene que tener muy en cuenta debido a que, como se ha visto en el transcurso del proyecto, parece interesante tenerlo en cuenta debido a sus características.
- Sería también interesante realizar un estudio para poder ver qué sucede mientras el motor trabaja saturado y que pérdidas se producen en él.
- Seguir con el estudio del programa Flux y en especial la herramienta "Coupling to Simulink", en su nueva versión 11.2, y explorar todas las opciones que ofrece.

7. Referencias

[AND04] Andrada, P.; Blanqué, B.; Castellana, F.; Martínez, E.; Perat, J.I.; Torrent, M.; Sánchez, J.A. "El motor de reluctancia autoconmutado". *Técnica Industrial*. 2004, Madrid, nº16.

[AND05] Andrada, P. "Introducción al diseño de motores de reluctancia autoconmutados. Octubre 2005.

[BLA07] Blanqué Molina, Balduí. "Simulación interactiva de motores de reluctancia autoconmutados". *Tesis Doctoral* -Director: Andrada Gascón, Pere. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2007.

[FER13] Ferriol Portells, Pedro. "Diseño de un accionamiento de reluctancia autoconmutado orientado al control de par". Proyecto final de grado -Tutor: Blanqué Molina, Balduí. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2013.

[GAE10] Grup d'Accionaments Elèctrics amb Commutació Electrònica (GAECE). "accionamientos con motor eléctrico de reluctancia híbrido". Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2007.

[KRI01] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications", CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-0838-0.

[MIL93] T.J.E. Miller. "Switched reluctance motor and their control". Magna Physics Publishing, Oxford Science Publications. Oxford 1993.

[TORR12] Torres Moreno, Jordi. "Estudi de la optimització en el diseny de màquines SRM utilitzant elements finits". PFC - Director: Blanqué Molina, Balduí. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2012.